



УДК 621.311.24

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ  
ЛЕНТОЧНО-ВИНТОВОЙ  
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ****DESIGN FEATURES OF A RIBBON WIND POWER  
STATION**

**Завьялов Алексей Сергеевич**, аспирант каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул.Мира, 19. E-mail: zavyalov\_axel@mail.ru, тел.: +7(912)662-70-02

**Велькин Владимир Иванович**, кандидат технических наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.i.velkin@urfu.ru, Тел.: +7(922)104-62-48

**Alexey S. Zavyalov**, graduate student, Department “Nuclear power plants and renewable energy sources”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: zavyalov\_axel@mail.ru, Ph.: +7(912)662-70-02

**Vladimir I. Velkin**, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor., Prof., Department «Nuclear Energy and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.i.velkin@urfu.ru Ph.: +7 (343) 375-47-78

**Аннотация:** В статье описана ленточно-винтовая ветроэнергетическая установка, относящаяся к классу роторных ВЭУ. Особенностью установки является наклонная ось вращения и ряд унифицированных модулей. Отличительной чертой ВЭУ является модульность, т.е. возможность создания установки любой мощности от десятков Вт для бытовых нужд до десятков кВт для населенных пунктов, объектов инфраструктуры и различных антикризисных целей.

**Abstract:** The article describes a ribbon wind power plant, belonging to the class of the wind turbine rotor. A feature of the installation is inclined rotation axis and a number of standardized modules. A distinctive feature is the modularity of wind turbines, i.e. the ability to create an installation of any capacity from tens of watts for domestic use up to tens of kW for settlements, infrastructure and various anti-crisis objectives.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии; ветроэнергетика; ветроэнергетическая установка; роторная ВЭУ.

**Key words:** renewable energy; wind power; wind power plant; wind turbine rotor.

Ветроэнергетический потенциал России является одним из самых больших в мире [1]. Использование его в перспективе может позволить существенное повышение энергоэффективности в различных направлениях народного хозяйства.

В основу реализации проекта по разработке ленточно-винтовой ветроэнергетической установки (ЛВ ВЭУ) были положены следующие принципы:

- Обеспечение модульного исполнения ВЭУ на различные мощности, применяя для этого унифицированные конструктивные элементы.
- Использование ленточно-винтовых ветророторов [2] в настоящее время не имеющих полных аналогов в мире [3].

- Максимальное использование собственных возможности предприятия.
- Создание наиболее простого конструктива, основанного на минимальном количестве простых узлов и деталей.

В соответствии с изложенной концепцией реализовано конструктивное исполнение ВЭУ типа «Колибри», основанной на применении унифицированных элементов: ленточно-винтовых ветромодулей, состоящих из унифицированных ленточно-винтовых ветророторов и низкооборотных электрогенераторов (которые, в соответствии с концепцией, используются и в других целях, например в качестве высокомоментного электропривода). Ленточно-винтовой ветроротор изготавливается из плоских элементов – секторов, выполненных из листового

стеклотекстолита и собранных в спираль. Ветромуль имеет двухзаходную компоновку, что позволяет ему самоцентрироваться относительно оси вращения.

Как показали лабораторные испытания масштабных моделей ветроустановок, коэффициент передачи ( $C_p$ ) ветроустановки, установленной вертикально, находится в пределах 0,23-0,28. Максимальный  $C_p$  в пределах 0,38-0,43 был получен в лабораторных условиях при наклоне ветроустановки относительно потока на угол  $\approx 115-120^\circ$ . При дальнейшем увеличении угла,  $C_p$  уменьшается.

Ленточно-винтовой ветроустановки, установленный наклонно развивает достаточный крутящий момент для начала вращения при слабых ветрах. Так ленточно-винтовой ветроустановки диаметром 1200 мм устойчиво вращается при скорости ветра около 1 м/с.

Конструктивное исполнение ветроустановок позволяет применять различные компоновочные решения при реализации конструктивов ВЭУ.

Параметры ветроэнергетической установки типа Колибри КОВ (рис. 1) приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры ветроустановок

№	Параметры	Знач.
1	Диаметр ветроустановки [м]	0,36
2	Ширина ленточно-винтовой поверхности [мм]	70
3	Шаг накрутки [мм]	240
4	Количество витков [шт.]	6
5	Высота ветроустановки [м]	1,92
6	Площадь ометаемой поверхности [м <sup>2</sup> ]	0,69
7	Номинальная мощность (при $V_0=10$ м/сек) [Вт]	200

Характеристика распределения вырабатываемого тока, крутящего момента и мощности ветроустановки в зависимости от числа оборотов ветроустановки и напряжения генератора (как источников ограниченной мощности) представлена на рис.2.

Пояснения к рис. 2:

$$n = [\omega_n \phi / \omega_n \text{ xx}]$$

$$I = [I_\phi / I_{\text{кз}}]$$

$$V = [V_{\text{наб}} / V_0]$$

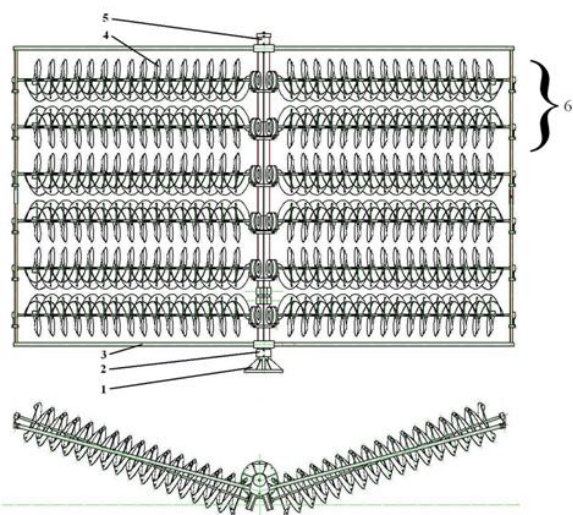


Рис. 1. ВЭУ «Колибри КОВ»

1 – основание; 2 – подшипниковые узлы; 3 – каркас; 4 – ветроустановки; 5 – ступица, выполненная в форме тонкостенной трубы; 6 – ветромуль.

При работе ветроустановки на холостом ходу ветер создаёт минимальный крутящий момент (необходимый лишь для преодоления силы трения в подшипниках). В идеале на холостом ходу момент вращения стремится к 0 и ветроустановка вращается «со скоростью ветра», при этом  $V_{\text{xx}} = 0$ .

Мощность, развиваемая ветроустановкой при установившемся ветре

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^3 \cdot c_p = k_0 \cdot V_0^3 = \omega_n \cdot M \quad (1)$$

где:

$\rho$  – плотность воздуха при  $0^\circ \text{C} = 1,29 \text{ кг/м}^3$

$S$  – ометаемая ветром площадь ветроустановки [м<sup>2</sup>]

$c_p$  – коэффициент передачи мощности

$$k_0 = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot c_p$$

$\omega_n$  – угловая скорость вращения ветроустановки [рад/сек]

$M$  – момент вращения, развиваемый ветроустановкой [Н·м]

При заторможенном ветроустановке момент вращения определяется по формуле:

$$M = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 \cdot c_a \cdot r = k_1 \cdot V_0^2 \quad (2)$$

где:

$c_a$  – аэродинамический коэффициент  $c_a \leq 1$

$r$  – радиус ветроустановки [м]

$$k_1 = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot c_a \cdot r$$

При полностью остановленном роторе ( $\omega_n=0$ ) и установившейся силе ветра со скоростью  $V_0$  на ветроустановку набежит максимальный поток ветра  $V_{\text{наб}} = V_0$  и, соответственно, действует максимальный крутящий момент. Абсцисса отображающая скорость набегающего на

ветроротор потока  $V$  (в относительных единицах) отображена на рис.2.

$$V = V_{\text{наб}} / V_0; V_{\text{заторможенного ротора}} = 1 \quad (3)$$

Соотношение числа оборотов ветроротора на холостом ходу и скоростью ветра определяется по формуле:

$$\omega_n \cdot k_2 = V_0 \quad (4)$$

где:

$k_2$  – коэффициент быстроходности, зависящий от геометрической формы ветроротора

Определим относительную частоту вращения ветроротора:

$$n = \omega_{\text{нф}} / \omega_{\text{нхх}}; n_{\text{хх}} = 1 \quad (5)$$

где:

$\omega_{\text{нф}}$  – факт. число об. ветророторов под нагрузкой

$\omega_{\text{нхх}}$  – скорость вращения ветроротора на хх

Относительная величина тока, вырабатываемого генератором:

$$I = I_{\text{ф}} / I_{\text{кз}}^*; I_{\text{кз}}^* = 1 \quad (6)$$

где:

$I_{\text{ф}}$  – ток, вырабатываемый генератором под нагрузкой.

$I_{\text{кз}}^*$  – ток короткого замыкания «идеального» генератора ( $k_{\text{потерь}} = 0$ )

$$I_{\text{кз}}^* > I_{\text{кз}}; n_{\text{кз}} > n_{\text{кз}}^*; n_{\text{кз}}^* \rightarrow 0 \quad (7)$$

где:

$I_{\text{кз}}$  – ток короткого замыкания «реального» генератора, обладающего внутренним сопротивлением и другими «недостатками»

$n_{\text{кз}}^*$  – число оборотов «идеального» генератора в режиме короткого замыкания

$n_{\text{кз}}$  – число оборотов «реального» генератора в режиме короткого замыкания

Число оборотов ветроротора в режиме короткого замыкания – соответствует режиму заторможенного ветроротора, но так как генератор – «реальное» изделие, обладающее определённым коэффициентами внутренних потерь, на нём будет гаситься часть мощности, развиваемой ветроротором. Вал ветроротора в данных условиях будет медленно вращаться, при этом будет вырабатываться максимальный ток ( $I_{\text{кз}}$ ), соответствующий распределению  $M$  (рис.2) при  $k_0=k_1=k_2=1$

На графике (рис.2) ордината  $I_{\text{кз}}$  определяет геометрическое место точек по току и числу оборотов реального генератора.

С увеличением эквивалентного сопротивления нагрузки, действующий ток генератора ещё больше уменьшается, вплоть до 0.

Как видно из графика, максимальную мощность от источника ограниченной мощности можно получить при следующих условиях:

– при стабилизации частоты вращения ветроротора  $n$  на уровне  $0,33(3) n_{\text{хх}}$ ;

– при стабилизации потребляемого тока  $I$  на уровне  $0,44(4) I_{\text{кз}}$ ;

– при выполнении алгоритма, обеспечивающего получение максимальной мощности путём постоянного изменения скорости вращения ветроротора в «+» и в «-», измерением параметров тока и напряжения и, таким образом установления оптимального числа оборотов ветроротора для получения максимальной мощности.

Основой конструктива является горизонтальное расположение ветророторов с наклоном оси по отношению к вектору потока на  $120^\circ$ . Данная ВЭУ рассчитана на использование ветророторов диаметром 0,36 м. Каждый ветромодуль содержит 4 ветроротора, объединенных в пары и расположенных горизонтально с двух сторон от ступицы ветромодуля. Ступица ветромодуля установлена вертикально и является базовым элементом для закрепления ветромодулей. Ступица ветромодулей устанавливается с использованием подшипниковых узлов на вертикальную ось, которая является опорой для всей ВЭУ. Ступица и, соответственно, ветророторы, благодаря невыпуклому углу, образованному между ними, свободно ориентируется (без дополнительных стабилизаторов) по направлению ветра. ЛВ ветророторы, расположенные горизонтально, попарно с двух сторон от ступицы, под воздействием ветра вращаются навстречу друг другу, что создаёт эффект Магнуса, обеспечивая тем самым некоторое увеличение парциального давления с наветренной стороны ветромодуля, позволяющее получить увеличенный коэффициент преобразования энергии ветра в полезную энергию.

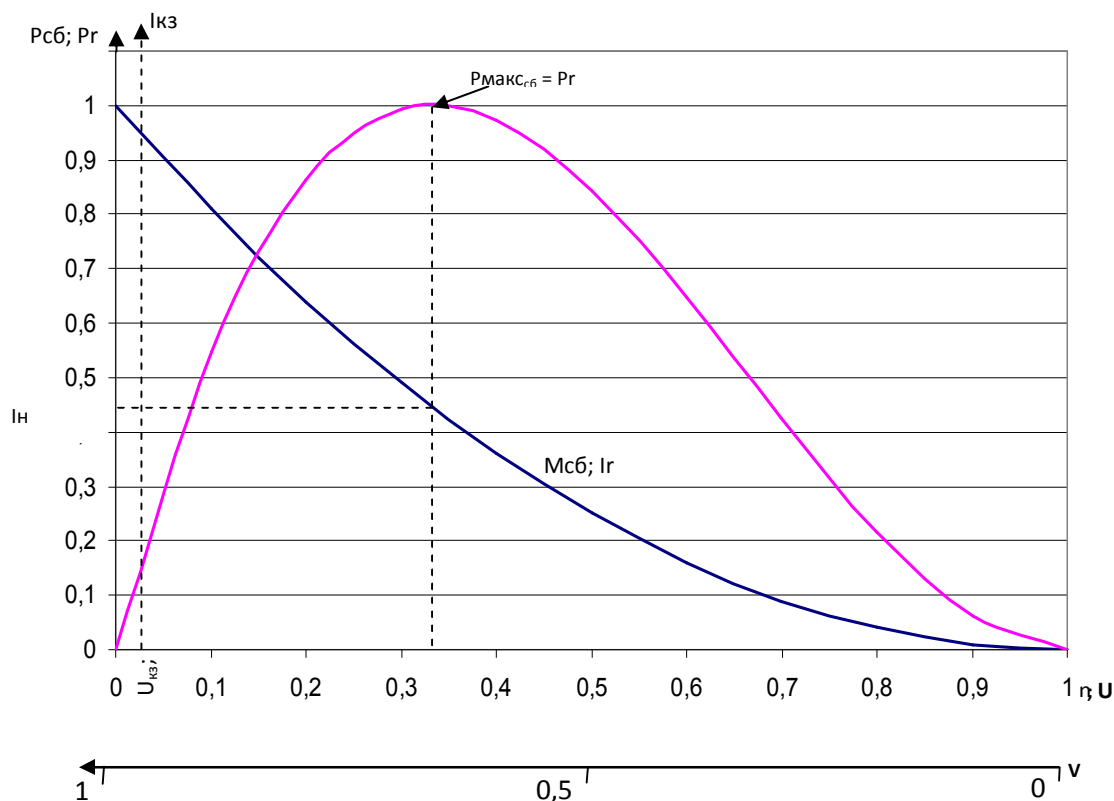


Рис. 2. Характеристика распределения вырабатываемого тока, крутящего момента и мощности ветрогенератора в зависимости от числа оборотов ветрогенератора и напряжения генератора

ВЭУ типа «Колибри» может быть применена в различных энергетических проектах:

- Сокращение потребления энергии городскими инфраструктурами из стационарных силовых сетей;
- Использование модульной ВЭУ в сетях уличного освещения, светоотражения высотных объектов;
- Частичное или полное энергозамещение потребности освещения удаленных автомагистралей и придорожных инфраструктур
- Частичное или полное энергозамещение потребности освещения в сфере коммунальных служб, а также в сфере обслуживания;
- Частичное или полное замещение и обеспечение энергией удаленных объектов, в том числе в АПК, небольших деревень, поселках и др.
- Использование для нужд Минобороны в удаленных гарнизонах и точках, Минприроды для метеостанций, а также Министерства чрезвычайных ситуаций при нарушении или отсутствии энергоснабжения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безруких П.П., Грибков С.В. Ветроэнергетика, Москва, Энерготехиздат, 2015 г., 318 с.
2. Ветрогенератор: пат. на полезную модель 111894 РФ / Тимофеев В.М., Станилевич М.А. Опубл. 27 декабря 2011 г.
3. Ленточно-винтовой ветрогенератор: пат. на полезную модель 160368 РФ / Завьялов А.С., Тимофеев В.М., Пролиско Ю.Г. Опубл. 18 февраля 2016 г.
4. Модульная ветроэнергетическая установка: пат. на изобретение 2607711 РФ / Завьялов А.С., Тимофеев В.М. Опубл. 10 января 2017 г.
5. Вашкевич К.П. Аэродинамические характеристики ветродвигателей ветроэлектрических установок [Текст] / К.П. Вашкевич // Известия Академии Наук: Энергетика. – 1997.-
6. Елистратов В.В. Экспериментальные исследования ВЭУ со спиральными лопастями [Текст] / В.В.Елистратов, Е.Н.Быков // Материалы VII международной конференции «Нетрадиционная энергетика в XXI веке».-Крым, 2006. – с.86-90